

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 6 — 1965

523.72.001.5 : 546.212

Е. П. АНИСИМОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В УЧИНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Исследовался закон ослабления проникающей солнечной радиации с глубиной в летний период для Учинского водохранилища. Определен коэффициент ослабления проникающей радиации для различных участков спектра. Исследовалась зависимость этого коэффициента от высоты солнца.

При решении многих задач гидрофизики и гидробиологии водоемов, таких, как формирование термического и светового режима верхнего деятельного слоя, определения коэффициента турбулентного обмена, поведения и концентрации планктона на различных глубинах и других, требуется знание законов ослабления проникающей под поверхность водоема и распространяющейся в нем суммарной солнечной радиации.

Однако посвященные этому вопросу исследования немногочисленны и относятся в основном к морям [1, 2, 3] и горным озерам [4] с высокой прозрачностью вод. Основной задачей этих исследований являлось изучение объемного поглощения суммарной солнечной радиации водой и нахождение закона ослабления ее с глубиной.

Как известно, процесс ослабления радиации в чистой дистиллированной воде хорошо описывается законом Буге:

$$I = I_0 e^{-\beta z}, \quad (1)$$

где I_0 — интенсивность проникающей под поверхность воды радиации, I — интенсивность радиации, прошедшей через слой воды толщиной z , β — коэффициент ослабления радиации (β зависит от длины волны). Для чистой дистиллированной воды коэффициент β не меняется с глубиной.

Упомянутые работы показали, что процесс ослабления проникающей суммарной солнечной радиации с глубиной не может быть хорошо описан простым законом Буге.

Зависимость $\ln I/I_0$ от глубины z не является прямой линией, а претерпевает один или несколько изломов, т. е. коэффициент β меняется с глубиной; при этом глубина, на которой наблюдаются эти изломы, для различных водоемов различна.

Для описания распространения солнечной радиации в реальных водоемах в работе [5] была предложена аппроксимация закона ослабления:

$$I = \sum I_m(\tau) e^{-\beta_m z}, \quad (2)$$

где I_m и β_m — соответственно проникающая под поверхность водоема падающая радиация и коэффициент ослабления радиации для m -го участка спектра. При этом β_m уже не зависит ни от длины волны, ни от глубины.

Таким образом, оказалось возможным процесс ослабления радиации в реальных водоемах описывать суммой нескольких экспонент. На основе этой аппроксимации в работах [2, 3] и [4] показано, что для Черного моря и для озера Севан закон ослабления солнечной радиации с глубиной с достаточной степенью точности может быть представлен суммой двух-трех экспонент.

Сравнивая значения коэффициента ослабления солнечной радиации, полученные для различных водоемов, можно отметить довольно большой разброс в этих значениях. Это и понятно, так как природные водоемы весьма сильно отличаются друг от друга по оптическим свойствам воды, в частности по прозрачности.

В работе [2] сделана попытка установить зависимость между коэффициентом ослабления проникающей солнечной радиации и прозрачностью воды для различных районов Черного моря, но этих данных слишком мало, чтобы сделать какие-либо количественные выводы.

Помимо водоемов с большой прозрачностью вод, к числу которых относятся моря и горные озера (прозрачность — десятки метров по белому диску), существует большое количество водоемов с низкой прозрачностью воды (всего несколько метров по белому диску). Таковы, например, равнинные озера и водохранилища. Воды этих водоемов чаще всего бывают окрашены, причем цветность воды обуславливается как наличием в ней красящих веществ, так и составом фито- и зоопланктона.

Процесс ослабления солнечной радиации с глубиной в таких водоемах будет иметь некоторые особенности, в частности распределение энергии по различным участкам спектра на разных глубинах будет иное, чем в водоемах с большой прозрачностью [6].

Настоящая работа посвящена исследованию некоторых особенностей проникновения лучистой энергии солнца на различные глубины в малопроточном пресном водоеме.

Измерения проводились летом 1963 г. в период с 20 июля по 23 августа на Учинском водохранилище Московской области. Основной целью проведенных измерений было нахождение закона ослабления солнечной радиации с глубиной как суммарной, так и для отдельных участков спектра, и определение зависимости коэффициента ослабления от высоты солнца.

В качестве приемника проникающей в воду радиации использовался пиранометр Янишевского, помещенный в герметический корпус. Входное отверстие закрывалось плексигласом (4 мм), коэффициент пропускания которого для различных участков спектра представлен на рис. 1. Коэффициенты пропускания в диапазоне длин волн от 0,3 до 1,2 м были измерены на СФ-4, а для длин волн от 1,2 до 3,5 м на ИКС-2.

Из рис. 1 видно, что плексиглас пропускает диапазон длин волн от 0,3 до 2,5 м, при этом видимая часть радиации проходит равномерно, а в инфракрасной области имеется несколько полос поглощения (1,58, 1,82, 2 м). Но если учесть, что радиация с длиной волны больше 3 м почти полностью поглощается уже в слое воды толщиной в 1 мм, а радиация с длиной волны больше 1 м в пресном водоеме поглощается примерно десятисантиметровым слоем воды [6], то можно считать, что приемник,

установленный глубже 10 см, воспринимает всю радиацию, проникающую на эти глубины.

Градуировка пиранометра проводилась методом сравнения его показаний с показаниями другого поверенного пиранометра: с этой целью в течение двух дней оба пиранометра помещались в воздухе рядом и одновременно снимались показания того и другого. Регистрирующими приборами служили гальванометры типа М-101, что позволяло проводить измерения с точностью до $0,005 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{мин}$.

При переходе пиранометра из воздуха в воду меняются условия отражения и преломления световых лучей на границе входного окна, вследствие чего чувствительность пиранометра в воде будет выше чувствительности его в воздухе [2]. Расчет показывает, что чувствительность пи-

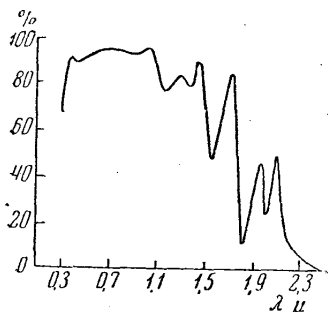


Рис. 1. Спектральная характеристика пропускания плексигласа (толщина 4 мм)

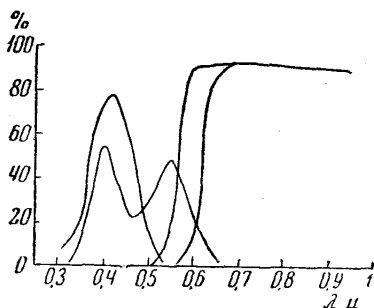


Рис. 2. Спектральные характеристики фильтров

ранометра при переходе из воздуха в воду увеличивается примерно на 15%.

В настоящей работе одновременно с измерением радиации, проникающей на различные глубины водоема, проводились измерения суммарной падающей и отраженной радиации в воздухе. Для дальнейшей обработки были отобраны только те серии, для которых расхождение между суммарной падающей радиацией и суммой отраженной и проникающей под поверхность воды радиацией составляло не более 15%.

Измерения подводной радиации проводились с понтона, установленного на глубине 11 м. Опускание прибора осуществлялось таким образом, чтобы на него не падала тень от понтона. Работа проводилась в солнечную безоблачную погоду, почти всегда при отсутствии волнения. В верхнем метровом слое измерения проводились на следующих горизонтах: 0, 0,08, 0,16, 0,26, 0,36, 0,46, 0,56, и 1 м, а далее через 0,5 м. (Нулевой горизонт соответствовал положению приемника непосредственно под поверхностью воды.)

На этих горизонтах были проведены измерения солнечной радиации как без фильтров, так и с фильтрами, спектральные характеристики которых изображены на рис. 2, что позволило определить закон ослабления не только суммарной проникающей радиации, но и отдельных участков спектра.

Для обработки были отобраны 42 серии измерений суммарной проникающей солнечной радиации и 12 серий измерений радиации с фильтрами. Отобранные серии наблюдений были обработаны графическим методом [3], т. е. построены зависимости $\ln I/I_0$ от глубины z . Примеры таких зависимостей приведены на рис. 3.

Измерения показали, что Учинское водохранилище является мало-прозрачным водоемом: на глубину 2 м проникает всего 5% радиации (по отношению к радиации, проникающей под поверхность воды), на глубину же 5 м проникает всего 0,5—1% радиации. Таким образом, верхний двухметровый слой поглощает почти всю солнечную радиацию. (Для Учинского водохранилища этот слой является слоем наибольшего скопления планктона [7].)

Это совпадает с аналогичными результатами, полученными в работе [6] для Ладожского озера и в работе [4] для озера Красавица и Цимлянского водохранилища, причем коэффициент ослабления для озера Красавица и Цимлянского водохранилища оказался равным 2 м^{-1} . Если ход изменения проникающей радиации для Учинского водохранилища аппроксимировать одной экспонентой, то коэффициент ослабления

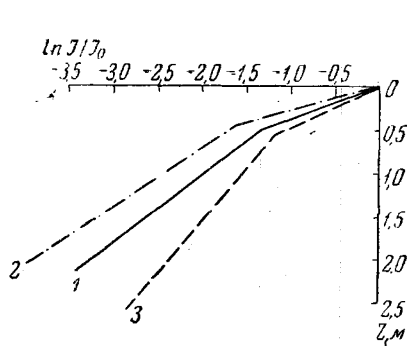


Рис. 3. Зависимость $\ln I/I_0$ от глубины z . 1 — для суммарной проникающей радиации, 2 — для синего светофильтра, 3 — для желтого светофильтра

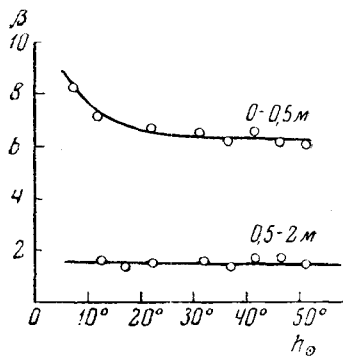


Рис. 4. Зависимость коэффициента ослабления суммарной проникающей радиации от высоты солнца

радиации оказывается равным $1,85 \text{ м}^{-1}$. По-видимому, озеро Красавица, Цимлянское и Учинское водохранилища близки по своим гидрооптическим свойствам.

Анализ полученных материалов по Учинскому водохранилищу показал, что закон ослабления проникающей солнечной радиации с глубиной не подчиняется простому экспоненциальному закону: зависимость $\ln I/I_0$ от z претерпевает излом на глубине $\sim 50 \text{ см}$ (см. рис. 3, кривая 1). В утренние и в вечерние часы глубина, на которой наблюдается этот излом, равна $60\text{--}65 \text{ см}$, а в дневные часы — несколько уменьшается, до 40 см .

Излом в зависимости $\ln I/I_0$ от z наблюдался и при измерениях с фильтрами на глубине $40\text{--}45 \text{ см}$ (см. рис. 3, кривые 2 и 3).

Отклонения закона ослабления проникающей в водоем солнечной радиации от простого экспоненциального закона, скорее всего, обуславливаются различной прозрачностью слоев воды в водоеме [8].

Ход изменения суммарной проникающей радиации с глубиной хорошо может быть аппроксимирован двумя экспонентами вида

$$I = I_0 (0,58 e^{-1,15z} + 0,42 e^{-5,95z}), \quad (3)$$

где I — радиация на глубине z , I_0 — радиация непосредственно под поверхностью воды. Второй член в выражении (3) затухает практически на глубине $0,5 \text{ м}$.

Аналогичного вида зависимости могут быть написаны и для отдельных участков спектра.

Помимо коэффициентов ослабления суммарной радиации были определены коэффициенты ослабления отдельных участков спектра. Зависимость коэффициента ослабления от длины волны представлена в таблице.

Как видно из таблицы, меньше всего в Учинском водохранилище в летний период ослабляется желто-зеленая область солнечного спектра.

Была сделана попытка найти зависимость коэффициента ослабления β от высоты солнца h_{\odot} как для суммарной радиации, так и для отдельных участков спектра. Зависимости β от h_{\odot} представлены на рисунках 4 и 5.

Остановимся сначала на зависимости коэффициента ослабления суммарной радиации от высоты солнца. Как следует из рис. 4, коэффициент ослабления β для суммарной радиации в слое воды ниже 0,5 м не зависит от высоты солнца. В слое же 0—0,5 м β меняется с высотой

Глубина 0,5—2 м	
Область спектра, $m \mu$	коэффициент ослабления β , (m^{-1})
350—475	1,4
375—600	1,0
>550	0,8
>625	1,0

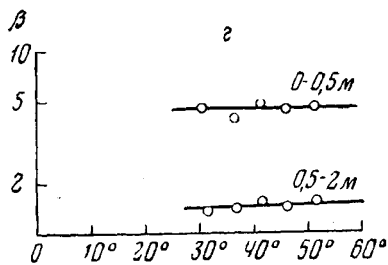
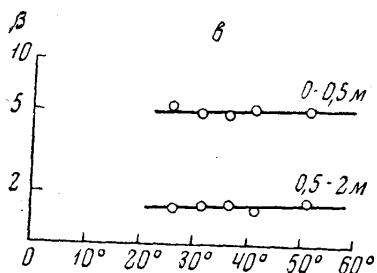
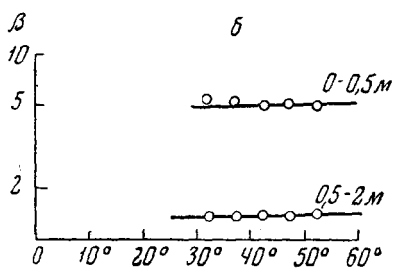
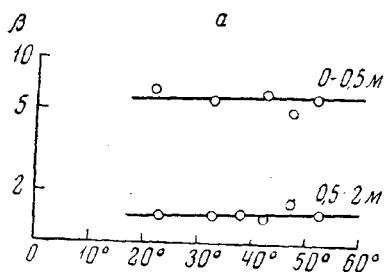


Рис. 5. Зависимость коэффициентов ослабления отдельных участков спектра проникающей солнечной радиации от высоты солнца. а — красный фильтр, б — желтый фильтр, в — синий фильтр, г — зеленый фильтр

солнца, причем наиболее сильное изменение β приходится на малые высоты солнца. Начиная же с высоты 25—30° коэффициент ослабления β становится постоянным.

Результат, аналогичный этому, был получен в работе [2] для откры-

тых частей моря: при изменении высоты солнца от 5 до 30° коэффициент ослабления меняется от 0,4 до 0,17 м⁻¹, а начиная с высот солнца 30° коэффициент ослабления меняется весьма незначительно. В работе [4] приводятся зависимости ослабления солнечной радиации в воде от высоты солнца для озера Севан. И в этом случае наиболее ярко эта зависимость проявляется при малых высотах солнца.

Зависимость коэффициента ослабления β от высоты солнца, по-видимому, обуславливается двумя факторами: 1) изменением спектрального состава падающей суммарной солнечной радиации с высотой солнца и 2) изменением длины хода луча в воде с высотой солнца.

Что касается изменения с высотой солнца спектрального состава падающей на поверхность водоема радиации в безоблачные дни, то, согласно [9], начиная с высот солнца 10—15°, он практически не меняется. Наши же измерения относятся только к высотам солнца большим 10°.

Что касается второго фактора, то расчет показывает, что отношение длин хода лучей при высоте солнца 10 и 53° (максимальная высота солнца в период работ на Учинском водохранилище) составляет 1,33 [10]. Отношение же величин коэффициентов ослабления суммарной радиации, соответствующих этим высотам солнца, составляет 1,27. Это позволяет предположить, что зависимость коэффициентов ослабления от высоты солнца в пределах от 10 до 53° обуславливается только зависимостью длины хода луча в воде от высоты солнца.

Рассмотрим рис. 5, на котором приведены зависимости коэффициентов ослабления β для различных участков спектра от высоты солнца. Из рисунка видно, что во всех четырех случаях β и в слое 0—0,5 м, и в слое 0,5—2 м не зависит от высоты солнца. Так как измерения с фильтрами проводились только при высотах солнца, больших 20°, то этот результат совпадает с предыдущим, что в интервале высот солнца от 25 до 53° для Учинского водохранилища коэффициент ослабления солнечной радиации можно считать постоянным.

Обработка материалов наблюдений показала, что на высоты солнца, меньшие 20°, в безоблачную погоду приходится всего около 9% (конец июля) и 13% (конец августа) всей радиации, проникающей в толщу воды в течение суток.

Таким образом, при решении задач о формировании термического режима верхнего деятельного слоя водоемов с учетом объемного поглощения солнечной радиации в воде можно считать коэффициент ослабления β независимым от высоты солнца. При этом ошибка в определении суммы поглощенной радиации будет меньше 10%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмин П. А. «Метеорология и гидрология», № 7—8, 1939.
2. Богуславский С. Г. «Труды МГИ АН СССР», 8, 1956.
3. Пивоваров А. А., Лаворко В. С. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ.-астрон., № 6, 1960.
4. Кириллова Т. В., Бюриг Р. Ф. «Труды ГГО», вып. 78, 1958.
5. Колесников А. Г. «Изв. АН СССР», сер. геофизическая, № 2, 1954.
6. Мокиевский. Научные сообщения Ин-та геологии и географии АН ЛитССР, т. XIII, 1962.
7. Вилекин. Пелагический зоопланктон Учинского водохранилища. Сб. «Учинское и Можайское водохранилища», 1962.
8. Трофимов А. В. «Метеорология и гидрология», № 3, 1938.
9. Тихов Г. А., Друри В. И. Сб. статей по аэрофотометрии. Изд. Всесоюз. картограф-треста, № 2, 1934.
10. Шулейкин В. В. Физика моря. Изд-во АН СССР, 1953.